

論文 局部腐食を考慮した PC 鋼線における応力腐食割れによる破断性状に関する実験的検討

白川 祐太*1・森川 英典*2・福田 圭祐*3・河村 睦*4

要旨: 凍結防止剤使用環境下における既設 PC 道路橋の PC 鋼線において局部腐食を確認した。局部腐食から破断に至る可能性があり、特に局部腐食箇所において断面減少による応力集中で応力腐食割れが発生することが懸念される。そこで、局部腐食を考慮し電食切欠きを施した PC 鋼線に対して、応力腐食割れ試験を実施した。その結果、局部腐食を考慮した PC 鋼線は、局部腐食のない PC 鋼線と比べ、非常に破断時間が短いことがわかった。また、局部腐食箇所での応力集中を考慮し、その指標である応力集中係数を用いて、切欠き部における最大応力と破断時間の関係を見ると、最大応力に対応して破断時間が短くなることがわかった。

キーワード: PC 鋼線, 破断, 応力腐食割れ, 応力集中係数

1. はじめに

凍結防止剤使用環境下で供用され、グラウト充填不良が発生している既設 PC 道路橋において、不良箇所に凍結防止剤が侵入することにより、写真-1 のように断面欠損を伴う局部腐食が発生している。この局部腐食は、いずれ破断に至る可能性が懸念され、特に局部腐食箇所において断面減少による応力集中で応力腐食割れによる脆性的な破断が懸念される。

また、一ツ葉大橋¹⁾や妙高大橋¹²⁾等において、現在破断事例の報告がある。文献¹⁾の PC 鋼より線においては、延性破断に至っている鋼材や長手方向に進展した亀裂を伴い脆性破断に至っている鋼材を確認できる。ここで用いられる伸線加工を施した PC 鋼線や PC 鋼より線は、硬く脆い組織であるセメンタイト相と軟らかく延性に優れたフェライト相の繊維状の多相組織で形成されている。応力腐食割れの亀裂は、応力腐食環境において、PC 鋼材に引張応力が作用し、フェライト相で鉄が溶出することにより亀裂が発生・進展し、その亀裂の進展をセメンタイト相が阻止し、セメンタイト相に沿って向きを変え、PC 鋼材の長手方向に進展することが知られている³⁾。これと同様に実橋梁においてもグラウト充填不良箇所の PC 鋼線において長手方向に亀裂が進展している場合は応力腐食割れが発生している可能性がある。

また、写真-1 における、グラウト除去、除錆前後の写真を見ると、シース内が腐食環境であるため全面的に鋼材が腐食しており、特にグラウトが付着していた箇所との境界では局部腐食が発生していた。また、PC 鋼線には引張応力が作用しているため、局部腐食箇所において応力集中が発生する。これらのことが PC 鋼線の局部腐食

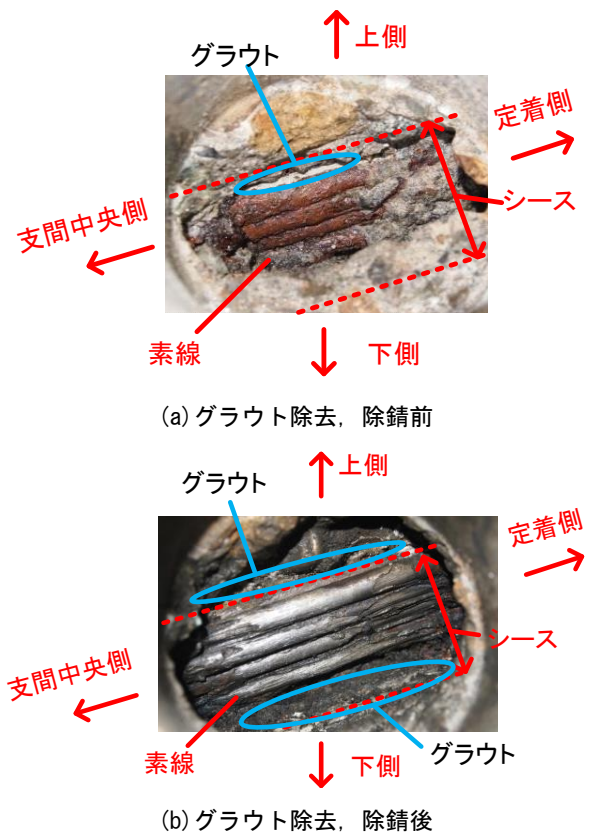


写真-1 凍結防止剤使用環境下の既設 PC 道路橋における腐食状況 (削孔調査結果)

箇所において応力腐食割れが発生する要因であると推測される。しかし、局部腐食の形状やその応力状態、応力集中度に対する応力腐食割れの性状や破断時間に対する検討がなされていないのが現状である。

そこで、本研究では、電食を用いて局部腐食を模擬し

*1 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 市民工学専攻 (正会員)

*2 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 市民工学専攻 教授 博(工) (正会員)

*3 神戸大学工学部市民工学科

*4 神鋼鋼線工業(株) 開発本部開発部

た PC 鋼線, 文献⁴⁾と同様に実橋梁を模擬し促進腐食試験を行った PC 鋼線を用いて, 応力腐食割れ試験を実施し, 局部腐食が発生した場合における応力腐食割れの破断性状, 応力集中度と破断時間の関係について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験に用いる PC 鋼線

本試験に使用する PC 鋼線の仕様を表-1 に示す。引張試験を実施し, 最大試験力, 最大荷重値を測定した結果も示している。その PC 鋼線に対して, 局部腐食を模擬するため, 図-1 のような電食切欠きを施した。電食切欠きは, 両側と片側の 2 パターンの加工を行った。また, 土木研究所資料⁵⁾において, 厳しい塩害環境に供用されていた実橋梁から採取した PC 鋼線の腐食形状をレーザー変位計を用いて測定した結果, 局部腐食の長さが最小 1mm, 最大 40mm と示されているため, 本研究では 1, 5, 40mm と設定した。また, 写真-1 の PC 鋼線や写真-1 と同様の橋梁の異なる削孔箇所における PC 鋼線の局部腐食長さを画像から測定すると, 23mm や 30mm であり, 今回設定した数値は実橋梁で発生する局部腐食範囲をおおむね考慮していることとなる。また, 試験荷重を設定するため, 静的引張試験により応力ひずみ関係を把握する必要がある。そのため, 両側電食を施した場合, ひずみゲージを貼付ける位置は電食を施していない。また, 文献⁴⁾と同様に, PC 鋼線束の供試体を作製し, 3%濃度の塩化ナトリウム水溶液に 1 日 1 時間浸漬させる乾湿サイクルを 130 日間実施した PC 鋼線も応力腐食割れ試験に使用した。ただし, 文献⁴⁾と異なり, 応力腐食割れ試験機に対応できるように, 図-2 のように供試体長さを変更している。使用する PC 鋼線は, 図-3 に示すように, シースと PC 鋼線配置断面図のうち, シース (塩化ビニール製の管) と接している PC 鋼線 c, PC 鋼線に囲まれ内側にある PC 鋼線 h, シースと反対側にある PC 鋼線 k を使用することとした。

2.2 試験方法, 試験要因

試験は, 図-4 に示す応力腐食割れ試験機を使用することとした。腐食液は, 応力腐食割れを促進させるため, 20wt%の硝酸アンモニウム水溶液(100℃)を使用した。腐食液に浸漬するとともに, 各々の試験荷重を作用させ, 破断までに要する時間 (破断時間) を計測した。試験要因一覧を表-2 に示す。両側 1mm(No.1)は, 電食後 1 ヶ月間, 1 日数回切欠き箇所 に 3%濃度の塩化ナトリウム水溶液を散布させる促進腐食を実施した PC 鋼線も用意した。また, 試験荷重は, 設計荷重として 0.6Pu(Pu: 表-1 に示す引張試験により測定した最大試験値・最大荷重値)と設計荷重より平均応力レベルを上げ, かつ各電食切欠き PC

表-1 PC 鋼線の仕様

線径	公称断面積	規格		引張試験結果	
		0.2%永久伸びに対する試験力	最大試験力	0.2%永久伸びに対する試験力	最大試験力
mm	mm ²	kN	kN	kN	kN
7	38.48	54.9	62.3	58.5	66.8

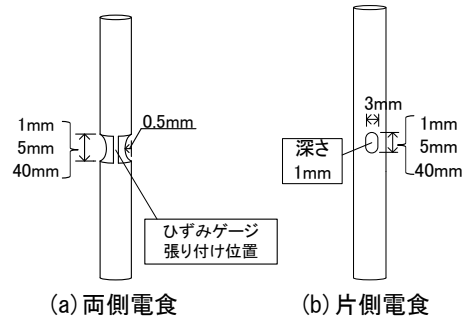


図-1 PC 鋼線の電食切欠き形状

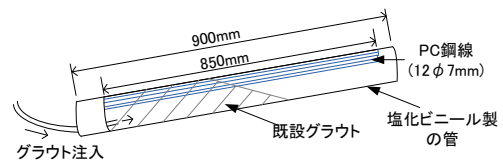


図-2 促進腐食試験供試体の概要図

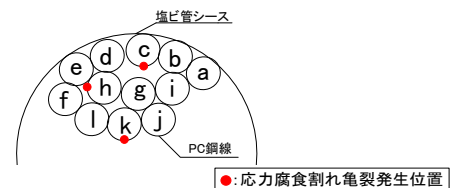


図-3 応力腐食割れ試験に使用する促進腐食供試体のシースと PC 鋼線配置断面図および亀裂発生位置

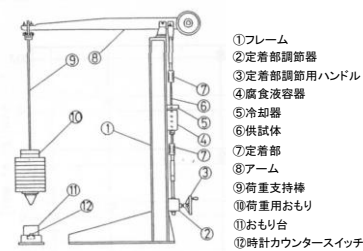


図-4 応力腐食割れ試験機

鋼線の平均応力レベルを同一にすることを目的に, 0.2%耐力の 85% 荷重の 2 種類を用いた。

3. 試験結果および考察

3.1 供試体における比較考察

試験結果一覧を表-3, 試験後の各切欠き形状の破断面の写真を写真-2 に示す。また, 電食切欠き PC 鋼線の電食切欠き長さ と破断時間の関係を示した図を 図-5 に示す。局部腐食のない健全と比較して, 応力集中が発生し

表-2 応力腐食割れ試験要因一覧

PC鋼線名	電食形状	試験荷重	試験本数
健全1	-	設計荷重(40.1kN)	1本
健全2	-	0.2%耐力の85%(49.7kN)	1本
促進腐食	-	設計荷重(40.1kN)	3本
No.1	両側1mm (電食後促進腐食)	設計荷重(40.1kN)	3本
No.2	両側1mm	設計荷重(40.1kN)	3本
No.3		0.2%耐力の85%(45.6kN)	3本
No.4	両側5mm	設計荷重(40.1kN)	3本
No.5		0.2%耐力の85%(40.9kN)	3本
No.6	両側40mm	設計荷重(40.1kN)	3本
No.7		0.2%耐力の85%(43.3kN)	3本
No.8	片側1mm	設計荷重(40.1kN)	3本
No.9		0.2%耐力の85%(46.4kN)	3本
No.10	片側5mm	設計荷重(40.1kN)	3本
No.11		0.2%耐力の85%(42.4kN)	3本
No.12	片側40mm	設計荷重(40.1kN)	3本
No.13		0.2%耐力の85%(44.9kN)	3本



(a) 両側電食 1mm



(b) 両側電食 5mm



(c) 両側電食 40mm



(d) 片側電食 1mm



(e) 片側電食 5mm



(f) 片側電食 40mm

表-3 応力腐食割れ試験結果一覧

PC鋼線名	電食形状	試験荷重	破断時間(h)			平均
健全1	-	設計荷重(40.1kN)	765.8			765.8
健全2	-	0.2%耐力の85%(49.7kN)	145.3			145.3
促進腐食	-	設計荷重(40.1kN)	1.1	14.3	157.6	57.6
No.1	両側1mm (電食後促進腐食)	設計荷重(40.1kN)	17.0	15.7	14.2	15.6
No.2	両側1mm	設計荷重(40.1kN)	21.7	20.8	19.1	20.6
No.3		0.2%耐力の85%(45.6kN)	11.7	11.4	12.6	11.9
No.4	両側5mm	設計荷重(40.1kN)	16.3	20.7	26.1	21.0
No.5		0.2%耐力の85%(40.9kN)	20.2	24.0	21.4	21.9
No.6	両側40mm	設計荷重(40.1kN)	28.6	17.7	20.2	22.2
No.7		0.2%耐力の85%(43.3kN)	17.4	18.8	15.1	17.1
No.8	片側1mm	設計荷重(40.1kN)	32.8	34.0	26.0	30.9
No.9		0.2%耐力の85%(46.4kN)	25.6	19.6	24.5	23.3
No.10	片側5mm	設計荷重(40.1kN)	43.6	44.0	39.8	42.5
No.11		0.2%耐力の85%(42.4kN)	37.3	25.6	18.3	27.1
No.12	片側40mm	設計荷重(40.1kN)	166.5	44.9	155.1	122.1
No.13		0.2%耐力の85%(44.9kN)	127.3	21.9	51.9	67.0



(d) 促進腐食 c



(e) 促進腐食 h



(f) 促進腐食 k

写真-2 試験後の破面写真

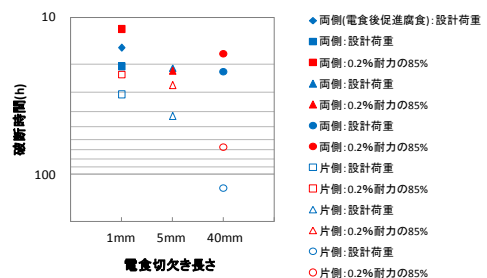


図-5 電食切欠き長さと破断時間の関係

ている切欠き PC 鋼線の破断時間の方が短い結果となった。以下に、各供試体の比較を行う。

まず、図-2の供試体で促進腐食を行った PC 鋼線の結果を見ると、異なる腐食性状を有する PC 鋼線を選択しているため、ばらつきが大きい結果となった。シーストと PC 鋼線の断面において亀裂発生位置を示した図-3より、PC 鋼線 cやhは局部腐食が発生しやすい隙間⁴⁾において亀裂発生に至っていることがわかる。実際に、写真-2を見ると、応力集中が発生している局部腐食発生位置から亀裂発生に至っている。しかし、PC 鋼線 kは、PC 鋼線間の隙間における腐食箇所から亀裂進展に至っていない。これは、隙間により腐食が進展した亀裂発生位置の反対

側である写真-3を見ると、PC 鋼線全体で腐食が小さく、腐食箇所では応力集中が生じず、引張による応力集中と無関係に亀裂が発生、進展に至ったと推定することができる。次に、両側 1mm において電食後促進腐食を行った PC 鋼線(No.1)と電食のみの PC 鋼線(No.2)を比較すると、電食のみより電食後促進腐食を行った PC 鋼線の破断時間の方が短い結果となった。これは、1ヶ月間、促進腐食を行うことで、切欠き部においてさらに腐食が進行したことや PC 鋼線表面が乱れることにより、さらに応力

集中が発生したことが原因で破断時間が短くなったと考えられる。次に、両側 1,5,40mm において、設計荷重と 0.2%耐力の 85%の結果の比較を行う。両側 1mm と 40mm においては、設計荷重より 0.2%耐力の 85%の PC 鋼線の破断時間の方が短い結果となり、平均応力レベルが増加するとともに、破断時間が短くなることわかる。しかし、両側 5mm では、設計荷重の破断時間の方が短い結果であった。これは、設計荷重(40.1kN)と 0.2%耐力の 85%(40.9kN)の差が 0.8kN 程度で試験荷重がほぼ同程度であるため、平均破断時間 0.9hour の差はばらつきの範囲内であると考えられる。次に、設計荷重において、両側 1, 5, 40mm を比較すると、40mm から 1mm になるほど、破断時間が短い結果となり、腐食区間が短いほど、応力集中が高いと考えられる。次に、片側 1, 5, 40mm において、設計荷重と 0.2%耐力の 85%の結果の比較を行うと、設計荷重より 0.2%耐力の 85%の PC 鋼線の破断時間の方が短い結果となり、両側の供試体と同様に、平均応力レベルが増加するとともに、破断時間が短くなることわかる。次に、設計荷重と 0.2%耐力の 85%において、片側 1, 5, 40mm を比較すると、40mm から 1mm になるほど、破断時間が短い結果となり、腐食区間が短いほど、応力集中が高いと考えられる。次に、両側 1mm と片側 1mm の電食を施した後の残存面積を示す表-4 をみると、同等の残存面積であるため、両側 1mm と片側 1mm の比較を行う。片側 1mm より両側 1mm の破断時間の方が短い結果となった。これは、両側電食を施している場合、片側電食と異なり、応力集中箇所が多く、亀裂が発生しやすかったことが考えられる。

3.2 応力集中の検討方法

3.1 節において、局部腐食がない健全 PC 鋼線と電食切欠き PC 鋼線の違いである応力集中の発生有無や切欠き区間の長さの違いである応力集中の大きさにより、破断時間が異なることがわかった。また、写真-2 より応力集中が発生していると考えられる同一の箇所から亀裂が進展し、応力腐食割れが発生している。そこで、文献⁵⁾で示される応力集中の指標である応力集中係数(最大応力=応力集中係数×平均応力)より、最大応力を算出し、破断時間との関係性を検討した。まず、応力集中係数算出方法について以下に示す。

まず、電食切欠き形状に対して文献⁵⁾に示されるモデルに適応させる。図-6 のように、電食切欠き 1mm は、応力集中係数の半円モデルに近い形状であることがわかる。また、電食切欠き 5, 40mm は、段差が生じているモデルに近い形状であることがわかる。ただし、試験に使用した PC 鋼線は、ひずみゲージを貼る位置に電食を施していないこと、および片側のみ電食を施した PC 鋼線があることから、厳密には、応力集中係数算出モデル

と異なる形状を示しているが、本検討では近い形状である応力集中係数算出モデルを採用することとした。電食切欠き 1mm の応力集中係数(応力集中率)の図を図-7、電食切欠き 5,40mm の図(丸棒モデル)を図-8、電食切欠き 5, 40mm の図(板状モデル)を図-9 に示す。各図は、各形状の丸棒および板状モデルで実験、解析された結果である。電食切欠き 1mm の場合、3次元(西谷式)が丸棒モデル、2次元が板状モデルである。これらの応力



写真-3 促進腐食 k の亀裂反対側写真

表-4 各電食切欠きの残存面積

素線の種類		残存面積
単位		mm ²
健全		38.5
両側	1mm	35.0
	5mm	31.7
	40mm	33.5
片側	1mm	35.3
	5mm	32.9
	40mm	34.8

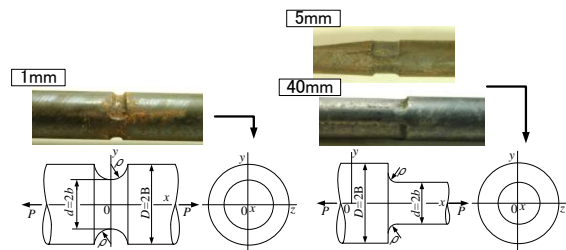


図-6 応力集中係数算出モデルの選択

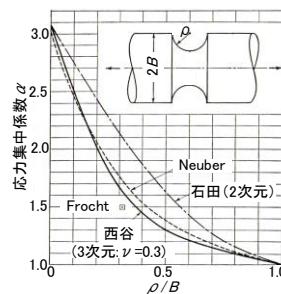


図-7 電食切欠き 1mm 応力集中係数⁵⁾

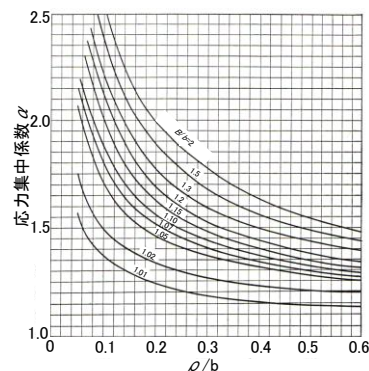


図-8 電食切欠き 5mm, 40mm 丸棒モデルの応力集中係数⁵⁾

集中係数の図で使用する曲率半径 ρ の算出は、試験に使用した PC 鋼線を用いる。各切欠き長さの PC 鋼線に対して 3 本使用し、1 本に対して 2 箇所の曲率半径 ρ を以下の式により算出する。

$$\rho = D/2 + L^2/8D \quad (1)$$

ここで、 L ：図-10 のように、切欠き内部の曲率半径が作用する円弧のある 2 点間の線の長さ、 D ： $L/2$ 位置における線 L から円弧まで L に対する垂線の長さ

この式 (1) は円上に L と D のような長さがわかるときの円の中心までの半径として導いている。 L と D は、使用した PC 鋼線の画像の切欠き箇所を拡大し、各長さを測定した。測定や電食施工のばらつきを考慮して曲率半径が測定可能である試験に使用した PC 鋼線 3 本を選択し、その PC 鋼線に対して図-6 の写真の亀裂進展していない上側と下側で 3 回同じ曲率位置に対して測定を行い、平均化した。算出した曲率半径を表-5 に示す。各切欠き形状において、その曲率半径を平均したものをを用いて、応力集中係数を算出したものを表-6 に示す。曲率半径が小さくなるほど、応力集中係数が高くなる傾向にある。

3.3 平均応力、最大応力と破断時間の関係

平均応力と破断時間の関係および以上で示した応力集中係数（丸棒）を用いて算出した最大応力と破断時間の関係を、両側 1 mm から 40mm で示したものを図-11 に、片側 1mm から 40mm で示したものを図-12 に、破断時間 200 時間までで全て示したものを図-13 に、応力集中係数（板状）を用いて算出し、破断時間 200 時間までで全て示したものを図-14 に示す。まず、電食切欠きの両側 1 mm から 40mm の結果を見ると、平均応力と破断時間の関係より、最大応力と破断時間の関係の相関性の方が高いことが伺える。最大応力が高いほど、破断時間が短いことがわかる。電食切欠きの片側 1 mm から 40mm の結果を見ると、両側と同様に、平均応力と破断時間の関係よりも最大応力と破断時間の関係の相関性の方が高いことが伺える。次に、全体における平均応力、最大応力と破断時間の関係を見ると、平均応力の関係よりも、最大応力の関係の相関性の方が高いことが伺える。応力腐食割れは、応力集中度によって破断時間が異なることがわかる。次に、図-13 と図-14 におけるモデルの違いについて比較を行うと、丸棒モデルは、50 時間程度で傾きが変化する 2 直線に相関している。板状モデルは、丸棒モデルと同様に、2 直線で相関性を有しており、丸棒モデルより板状モデルの応力集中係数の方が高いため、全体的に最大応力が大きくなったと考えられる。以上より、応力腐食割れは、応力集中が高いほど、破断時間が短くなることがわかった。そのため、局部腐食が発生している PC 鋼線に対して、補修の可否を判定する際に、腐食量のみで判定することをせず、応力集中度を考慮するこ

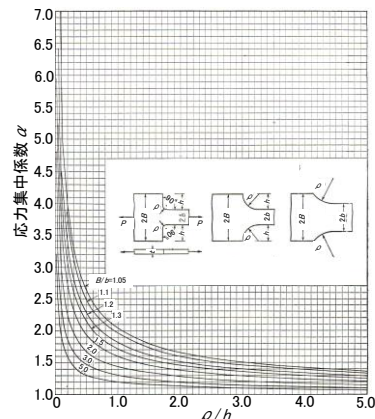


図-9 電食切欠き 5mm, 40mm 板状モデルの応力集中係数⁵⁾

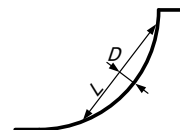


図-10 D および L の測定概略図

表-5 曲率半径の全データ

曲率半径測定素線No.	測定位置	1mm	5mm	40mm
1	上側	0.94	0.40	0.63
	下側	0.44	0.87	0.49
2	上側	0.57	0.72	0.38
	下側	0.71	0.59	0.54
3	上側	0.85	0.68	0.95
	下側	0.44	0.89	1.38

表-6 応力集中係数

素線の種類	残存面積	曲率半径	応力集中係数 (丸棒)	応力集中係数 (板状)
単位	mm ²	mm		
健全	38.48	-	1	1
両側	1mm	34.97	0.66	1.94
	5mm	31.70	0.69	1.59
	40mm	33.54	0.73	1.55
	1mm	35.31	0.66	1.94
片側	5mm	32.86	0.69	1.59
	40mm	34.80	0.73	1.55

とが必要である。しかし、実橋梁における応力集中度は測定が困難であるため、局部腐食を有する PC 鋼線は、応力集中度が高いと考え、局部腐食を確認した場合は補修を早期に行い、応力腐食割れ環境の改善を行うべきであると考え。

4. まとめ

局部腐食を考慮して、促進腐食を行った PC 鋼線や電食切欠きを施した PC 鋼線を用いて、応力腐食割れ試験を実施し、応力集中係数を用い、応力腐食割れ性状について検討を行った。その結果得られた知見を以下に示す。
 (1) 局部腐食を有する、もしくは電食切欠きを施した PC 鋼線は、健全な PC 鋼線より、応力腐食割れに対する破断時間が短くなることがわかった。
 (2) 促進腐食を行った PC 鋼線は、シースト PC 鋼線の隙

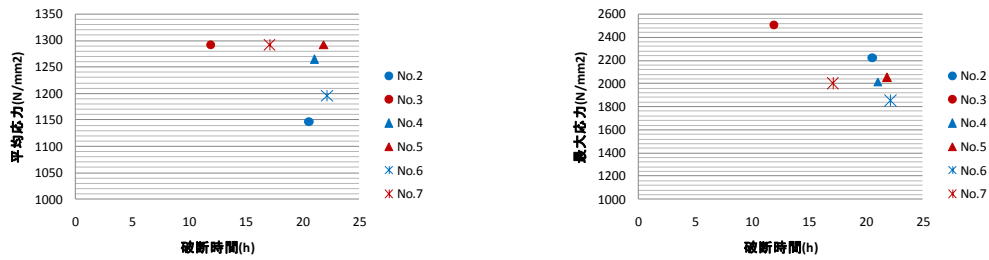


図-11 両側 1mm, 5mm, 40mm における応力と破断時間の関係 (左：平均応力, 右：丸棒モデルから算出した最大応力)

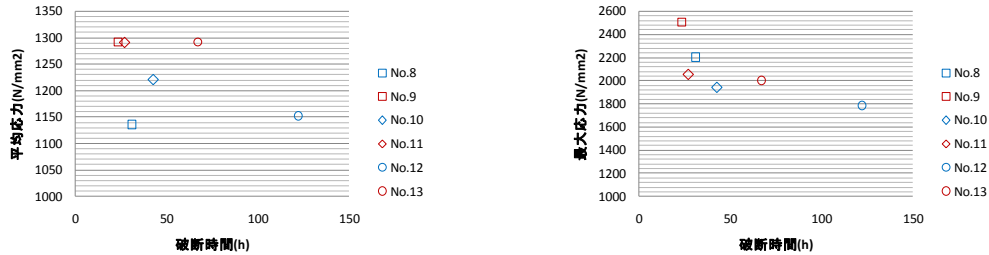


図-12 片側 1mm, 5mm, 40mm における応力と破断時間の関係 (左：平均応力, 右：丸棒モデルから算出した最大応力)

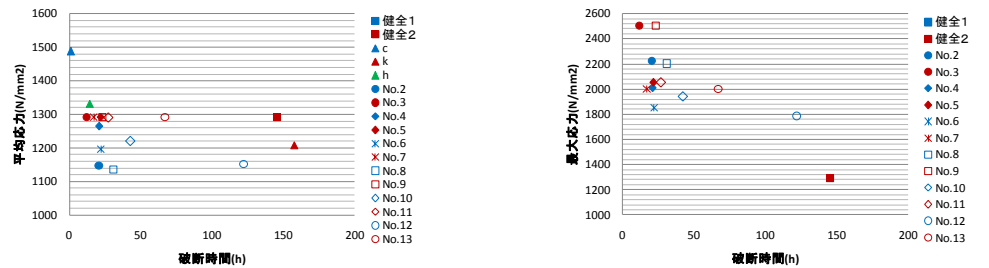


図-13 全ての PC 鋼線に対する応力と破断時間の関係 (左：平均応力, 右：丸棒モデルから算出した最大応力)

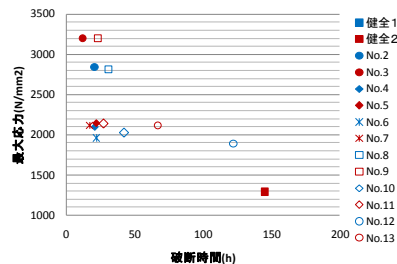


図-14 板状モデルで算出した最大応力と破断時間の関係

間やPC鋼線間の隙間において顕著に局部腐食が発生し、局部腐食が発生している箇所から亀裂進展していることがわかった。

(3)電食を施したPC鋼線は、電食長さが短いほど、応力レベルが高いほど、応力腐食割れに対する破断時間が短くなる傾向にあることがわかった。また、片側電食を施したPC鋼線より、亀裂発生位置が多いため両側電食を施したPC鋼線の破断時間の方が短いことがわかった。

(4)応力集中、最大応力が高いほど、破断時間が短くなる傾向にあることがわかった。実橋梁では安全のため応力集中度が高いと仮定して維持管理計画を立案する必要があるため、局部腐食箇所を確認した場合は早期に補修を行う必要があると考える。

参考文献

1) 日経コンストラクション 2011年12月12日号,

pp.54-58, 2011.

- 2) 小林憲一, 大平英生, 登石清隆, 羽田伸介: 妙高大橋のPCケーブル破断調査と対策, 橋梁と基礎 9, pp32-38, 2011.
- 3) プレストレストコンクリート, Vol.27, No.1, 1985, pp.117
- 4) 白川祐太, 森川英典, 鴨谷知繁: PCT橋のグラウト充填不良部における鋼線腐食メカニズムに関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.493-498, 2011.
- 5) 土木研究所: 塩害により損傷を受けたPC鋼材の機械的性質—塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(Ⅲ)—, No.3810, 2001.
- 6) 西田正孝: 応力集中増補版, 森北出版株式会社, pp.615-617, 632-636, 642-643, 1993.